

## СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ, СВЯЗАННЫЙ С РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ

© 2022 г. М. Б. Гохберг<sup>1, 4</sup>, **Н. И. Колосницын**<sup>1</sup>, А. О. Плисс<sup>2</sup>, Д. А. Алексеев<sup>1, 2, 3, 4, \*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”,  
г. Москва, Россия

\*E-mail: alexeevgeo@gmail.com

Поступила в редакцию 04.02.2021 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 13.06.2021 г.

В рамках уравнения Френкеля получено аналитическое решение для поля порового давления и связанного с ним электрического поля электрокинетической природы, сопровождающих распространение поверхностной волны Рэлея в пороупругой влагонасыщенной среде. Задача решена в частотной области с учетом граничного условия на земной поверхности. Показано, что решение может быть записано в виде суммы двух волн, первая из которых преобладает в самом приповерхностном слое и быстро затухает с глубиной, а вторая охватывает существенно больший интервал глубин и связана с распространением продольной составляющей волны Рэлея. Скорость экспоненциального затухания первой волны по глубине определяется толщиной скин-слоя, зависящей от коэффициента проницаемости пороупругой среды и ряда других параметров. Эта особенность приводит к сильной чувствительности вертикальной компоненты электрического поля, ассоциированного с первой волной, к изменению проницаемости поверхностного слоя, и открывает возможность ее определения по наблюдаемым величинам сейсмоэлектрического сигнала. Первая волна создает доминирующую часть электрокинетического эффекта на поверхности среды. В соответствии с уравнением Гельмгольца–Смолуховского получены выражения для вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности электрического поля. На основании оценок параметров волны Рэлея, зарегистрированной в районе горы Врангель на Аляске после Суматранского землетрясения ( $M = 9.0$ , 2004 г.), определены ожидаемые амплитуды вертикальной компоненты косейсмического электрического поля электрокинетической природы, лежащие в диапазоне от десятков мкВ/м до десятков долей-единиц В/м. Показана существенная зависимость амплитуд и толщины скин-слоя для данной компоненты от коэффициента проницаемости среды.

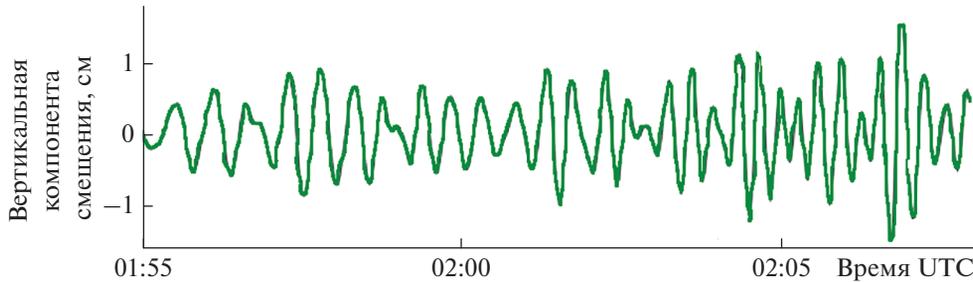
*Ключевые слова:* теория Био, уравнение Френкеля, пористая флюидонасыщенная среда, землетрясения, волна Рэлея, электрическое поле, электрокинетический эффект.

DOI: 10.31857/S000233372202003X

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение сейсмоэлектрических (СЭ) явлений в геофизике началось в первой половине 20 века с работ Р.Р. Томпсона, А.Г. Иванова, Я.И. Френкеля и М. Био [Thompson, 1936; Ivanov, 1939; 1940; Френкель, 1944; Biot, 1956], при этом было дано описание электрокинетического (ЭК) феномена в рамках уравнения Гельмгольца–Смолуховского, связывающего напряженность электрического поля с градиентом порового давления, и предложена соответствующая теория на основе флюидодинамики пористых сред, испытывающих сейсмическое воздействие.

Хотя в последние десятилетия интерес к СЭ методу возрос [Pride, 1994; Потапов и др., 1995; Светов, 2008; Svetov, 2015; Revil, Jardani, 2010; Revil et al., 2015; Jouniaux, 2016; Алексеев, Гохберг, 2018; 2019], основные исследования связаны с относительно высокочастотными процессами — волнами Био. Моделирование и интерпретация СЭ сигналов требуют решения сложной самосогласованной задачи, сочетающей уравнения флюидодинамики и электромагнитного (ЭМ) поля. При этом аналитическое решение последней было получено в очень ограниченном числе случаев [Pride, 1994], что не позволяет полно оценить



**Рис. 1.** Фрагмент низкочастотной (0.01–0.1 Гц) составляющей записи вертикальных колебаний на станции WANC (США, Аляска, гора Врангель), соответствующий телесеismicкому сигналу от Суматранского землетрясения 26.12.2004 г. (из работы [West et al., 2005], с изменениями).

информационные возможности СЭ метода. Представляется, что предложенные рядом авторов (С. Прайд, Б.С. Светов и В.П. Губатенко) представления стороннего тока в форме тех или иных частотных зависимостей, включающих градиент давления или разность смещений твердой и жидкой фаз, позволят проводить моделирование СЭ полей, однако требуют привлечения численных методов для решения фильтрационной задачи. Задача численного анализа распределений порового давления в модели пороупругой среды Био и ее обобщениях рассматривалась в большом количестве публикаций, но, как правило, без учета специфики того или иного деформационного процесса.

На практике соответствующие методы применяются весьма ограниченно, поскольку сталкиваются со сложностью регистрации и интерпретации сейсмоэлектрических полей. В то же время, существует понимание того, что внедрение технологий, основанных на использовании сейсмоэлектрических сигналов, может существенно расширить спектр получаемой информации о строении и параметрах недр, а также их динамическом состоянии [Svetov, 2015; Revil et al., 2015].

В настоящей работе проводится теоретический анализ процесса распространения волн Рэлея и связанных с ними колебаний порового давления в рамках модели влагонасыщенной пороупругой среды Био. С использованием телесеismicких сигналов, зарегистрированных в районе горы Врангель на Аляске после Суматранского землетрясения ( $M = 9.0$ , 2004 г.), определяются параметры деформации среды, используемые в последующем для оценки амплитуды вариаций порового давления. Приводится аналитическое решение уравнения Френкеля, обсуждаются его характерные особенности и дается анализ поведения электрического поля, возникающего под действием градиента порового давления в рамках электрокинетического механизма.

На основании рассмотренной теоретической модели может быть предложен метод оценки ряда

упругих и петрофизических параметров, основанный на измерении электрического поля, связанного с вертикальным градиентом порового давления, вызываемого прохождением поверхностных сейсмических волн.

### ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ СРЕДЫ ПО ЗАПИСИ ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА

С целью определения характерных параметров волны Рэлея, обратимся к записям телесеismicкого сигнала, зарегистрированного на Аляске после сильнейшего Суматранского землетрясения ( $M = 9.0$ , 2004 г.) (рис. 1). По данным, приводимым в работе [West et al., 2005], скорость волны Рэлея равна  $U = 3.7$  км/с, период колебаний  $T = 30$  с, длина волны  $\lambda = UT = 111$  км.

Для анализа поля смещений воспользуемся выражениями, вытекающими из волнового уравнения в случае плоской поверхностной волны Рэлея, распространяющейся в плоскости  $xz$  вдоль свободной поверхности полупространства  $z \leq 0$  в направлении оси  $x$  [Ландау, Лифшиц, 1965]:

$$u_x = u_{ix} + u_{\ell x} = b \left[ \frac{a \chi_i}{b k} \exp(\chi_i z) + \exp(\chi_\ell z) \right] \exp[i(kx - \omega t)], \quad (1)$$

$$u_z = u_{iz} + u_{\ell z} = -ib \left[ \frac{a}{b} \exp(\chi_i z) + \frac{\chi_\ell}{k} \exp(\chi_\ell z) \right] \exp[i(kx - \omega t)]. \quad (2)$$

Здесь:  $u_x$  и  $u_z$  – компоненты поля смещения;  $u_\ell$  и  $u_i$  – продольная и поперечная составляющие смещения, распространяющиеся со скоростями  $c_\ell$  и  $c_i$ , и имеющие амплитуды  $b$  и  $a$ , соответственно;  $k$  – волновое число. Коэффициенты затухания  $\chi_\ell$  и  $\chi_i$  связаны с волновым числом  $k$ , частотой  $\omega$  и скоростями  $c_\ell$  и  $c_i$  соотношениями:

$$\begin{aligned}\chi_l^2 &= k^2 - \frac{\omega^2}{c_l^2} = k^2(1 - \xi^2\gamma), \\ \chi_t^2 &= k^2 - \frac{\omega^2}{c_t^2} = k^2(1 - \xi^2).\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь  $\gamma = \frac{c_t^2}{c_l^2} = \frac{1 - 2\sigma}{2(1 - \sigma)}$ . Параметр  $\xi = \omega/(c_l k)$  — определяется алгебраическим уравнением

$$\xi^6 - 8\xi^4 + 8\xi^2(3 - 2\gamma) - 16(1 - \gamma) = 0. \quad (4)$$

В работе [Лейбензон, 1947] приводится точное решение этого уравнения для коэффициента Пуассона  $\sigma = 0.25$ :

$$\xi^2 = 2 - \frac{2}{\sqrt{3}} = 0.8453. \quad (5)$$

Как и в работе [West et al., 2005], мы используем это значение  $\xi^2$ . Получаем:

$$\chi_l = 0.8475k, \quad \chi_t = 0.3933k. \quad (6)$$

Поскольку  $k = 2\pi/\lambda = 5.661 \times 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ , то

$$\chi_l = 4.797 \times 10^{-5} \text{ м}^{-1}, \quad \chi_t = 2.226 \times 10^{-5} \text{ м}^{-1}. \quad (7)$$

Отсюда для характерных длин затухания продольной и поперечной составляющих волны Релея, получаем:

$$L_l = \frac{1}{\chi_l} = 20.8 \text{ км}, \quad L_t = \frac{1}{\chi_t} = 44.9 \text{ км}. \quad (8)$$

Это означает, что волна распространяется в поверхностном слое земной коры толщиной 20–45 км.

Отношение амплитуд поперечной и продольной составляющей  $\frac{a}{b}$  определяется формулой [Ландау, Лифшиц, 1965]:

$$\frac{a}{b} = -\frac{2 - \xi^2}{2\sqrt{1 - \xi^2}}.$$

Подставляя значение  $\xi^2$  согласно (20), находим

$$\frac{a}{b} = -1.468. \quad (9)$$

Амплитуда вертикальной компоненты волны Релея на поверхности  $z = 0$  согласно (2) равна:

$$u_z = -ib \left( \frac{\chi_l}{k} + \frac{a}{b} \right) \exp i(kx - \omega t). \quad (10)$$

Подставляя сюда полученные выше значения величин  $\chi_\ell/k$ , и  $a/b$ , получаем:

$$u_z = ib \times 0.6205 \exp i(kx - \omega t). \quad (11)$$

Полный размах вертикальных колебаний согласно работе [West et al., 2005] достигал 1.5 см. Соответственно максимальная амплитуда вертикаль-

ных колебаний была равна 0.75 см. Приравнивая это значение амплитуде  $u_z$ , находим параметр  $b$ :

$$b = 1.2087 \text{ см}. \quad (12)$$

### ОБЪЕМНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ВОЛНЕ РЕЛЕЯ И УРАВНЕНИЕ ФРЕНКЕЛЯ

Электрокинетический эффект, связанный с распространением волны Релея в пористой флюидонасыщенной среде, может быть описан в рамках уравнения Френкеля [Френкель, 1958], записываемого относительно возмущений порового давления  $p$ . Параметр  $p$  имеет смысл гидродинамического давления, возникающего в порах флюидонасыщенной горной породы под действием внешних механических сил. В случае низкочастотных процессов, в том числе телесейсмических колебаний с периодами в десятки секунд, уравнение Френкеля может быть приведено к виду [Гохберг и др., 2009]:

$$\Delta p - \frac{\beta' \eta}{k_p K_l} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\beta \eta}{k_p} \frac{\partial \vartheta}{\partial t}, \quad (13)$$

где:  $\vartheta$  — объемная деформация среды (объемное расширение);  $\rho$  и  $\eta$  — плотность и коэффициент вязкости жидкости;  $k_p$  — коэффициент проницаемости.

$$\beta = \left( 1 - \frac{K}{K_S} \right) \frac{1}{n}, \quad \beta' = 1 + (\beta - 1) \frac{K_l}{K_S}. \quad (14)$$

Здесь  $n$  — коэффициент пористости;  $K$ ,  $K_l$  и  $K_S$  — модули всестороннего сжатия сухой пористой породы, жидкости и твердого вещества, составляющего скелет среды, соответственно.

По определению  $\vartheta = \text{div} \mathbf{u}$ . Подставляя в эту формулу компоненты вектора смещений  $\mathbf{u}$  (1) и (2), находим:

$$\vartheta = ibk \left[ 1 - \left( \frac{\chi_\ell}{k} \right)^2 \right] \exp(\chi_\ell z) \exp[i(kx - \omega t)]. \quad (15)$$

Из этого выражения можно видеть, что объемная деформация связана только с продольной составляющей волны Релея, как это и должно быть, поскольку для поперечной составляющей  $\text{div} \mathbf{u}_t = 0$ .

Введем параметры:

$$d = \frac{\beta' \eta}{k_p K_\ell}, \quad q = \frac{\beta \eta}{k_p}, \quad \vartheta_0 = bk \left[ 1 - \left( \frac{\chi_\ell}{k} \right)^2 \right] \quad (16)$$

и перепишем уравнение (13). Получаем:

$$\Delta p - d \frac{\partial p}{\partial t} = -iq \vartheta_0 \omega \exp(ik + \chi_\ell z - i\omega t). \quad (17)$$

Произведем оценку параметров  $d$ ,  $q$ ,  $\vartheta$ . Используем известные характеристики среды: вязкость воды —  $\eta = 0.82 \times 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  при  $20^\circ \text{C}$ , модуль все-

стороннего сжатия воды –  $K_l = 2.1 \times 10^9$  Па [Физические величины, 1991], коэффициент проницаемости  $k_p \sim 10^{-8}/10^{-10}/10^{-12}/10^{-14}/10^{-16}$  м<sup>2</sup> [Schon, 2011]. Для оценки величин  $\beta$  и  $\beta'$  используем отношения  $K/K_s \approx 0.5$ ,  $K_l/K_s = 0.1$  [Gershenson, Vambakidis, 2001], что дает  $\beta = 5$ ,  $\beta' = 1.4$ . Для случая  $k_p = 10^{-12}$  м<sup>2</sup> (проницаемые карбонаты) с помощью соотношений (14) из (16) и приведенных справочных данных получаем следующие оценки:  $d = 5.467 \times 10^2$  м<sup>-2</sup> · с,  $q = 4.1 \times 10^{12}$  Па · м<sup>-2</sup> · с. Параметр  $\vartheta$  находится по приведенным выше оценкам, полученным с использованием записи волны Релея:  $\vartheta_0 = 1.9278 \times 10^{-7}$ .

Решение уравнения (17) ищем в виде:

$$p(x, z, t) = A(z) \exp(ikx + \chi_\ell z - i\omega t). \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17), для функции  $A(z)$  получаем уравнение:

$$A''(z) + 2\chi_\ell A'(z) + [(\chi_\ell^2 - k^2) + id\omega]A(z) = -iq\vartheta_0\omega. \quad (19)$$

Это уравнение имеет частное решение в виде константы:

$$A^{(0)}(z) = -\frac{iq\vartheta_0\omega}{id\omega + \chi_\ell^2 - k^2} \equiv -q\vartheta_0/d = \text{const}, \quad (20)$$

что позволяет перейти к однородному уравнению:

$$A''(z) + 2\chi_\ell A'(z) + [\chi_\ell^2 - k^2 + id\omega]A(z) = 0, \quad (21)$$

решение которого ищется в форме

$$A(z) = A_0 \exp(\kappa z). \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21), приходим к алгебраическому уравнению:

$$\kappa^2 + 2\chi_\ell \kappa + \chi_\ell^2 - k^2 + id\omega = 0, \quad (23)$$

которое можно переписать в виде:

$$(\kappa + \chi_\ell)^2 = -id\omega + k^2. \quad (24)$$

В правой части данного уравнения величина  $d\omega$  на 11 порядков по абсолютной величине превосходит  $k^2$ , поэтому с высокой точностью можно считать, что

$$\kappa \equiv -\chi_\ell \pm \sqrt{-i\sqrt{d\omega}} = -\chi_\ell \pm \frac{-1+i}{\sqrt{2}} \sqrt{d\omega}.$$

Из двух решений выбираем решение, соответствующее затуханию с глубиной. В итоге получаем:

$$\kappa = -\chi_\ell + \frac{1-i}{\delta}, \quad (25)$$

где

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{d\omega}} = \sqrt{\frac{2k_p K_\ell}{\omega \eta \beta'}}. \quad (26)$$

Отсюда находим решение однородного уравнения (21):

$$A(z) = A_0 \exp\left(-\chi_\ell z + \frac{1}{\beta} z - i\frac{1}{\beta} z\right).$$

Вместе с частным решением (20) получаем решение неоднородного уравнения (19):

$$A(z) = A_0 \exp\left(-\chi_\ell z + \frac{1}{\beta} z - i\frac{1}{\beta} z\right) - q\vartheta_0/d, \quad (27)$$

и в соответствии с (18) получаем решение уравнения (17), определяющее динамику поровой жидкости:

$$p = \left[ A_0 \exp\left(-\chi_\ell z + (1-i)\frac{1}{\beta} z\right) - \frac{q\vartheta_0}{d} \right] \times \exp(ikx + \chi_\ell z - i\omega t). \quad (28)$$

На свободной поверхности должно выполняться условие:

$$z = 0, \quad p = 0. \quad (29)$$

Это условие определяет постоянную  $A_0 = q\vartheta_0/d$ . В итоге, получаем решение уравнения Френкеля в виде:

$$p = \frac{q\vartheta_0}{d} \exp\left(i(kx - \omega t) + \frac{1-i}{\delta} z\right) - \frac{q\vartheta_0}{d} \exp(ikx + \chi_\ell z - i\omega t). \quad (30)$$

В действительных переменных решение принимает форму:

$$p = \frac{q\vartheta_0}{d} e^{z/\delta} \cos(kx - z/\delta - \omega t) - \frac{q\vartheta_0}{d} e^{\chi_\ell z} \cos(kx - \omega t). \quad (31)$$

Полученное решение содержит две волновых составляющих. Волна

$$p_2 = -\frac{q\vartheta_0}{d} e^{\chi_\ell z} \cos(kx - \omega t) \quad (32)$$

связана с распространением продольной составляющей волны Релея. Волна

$$p_1 = \frac{q\vartheta_0}{d} e^{z/\delta} \cos(kx - z/\delta - \omega t) \quad (33)$$

распространяется в приповерхностном слое толщиной порядка  $\delta$  и сопровождает волну Релея. Волна  $p_1$  создает доминирующую часть электрокинетического эффекта. На рис. 2. приводятся графики амплитуды колебаний порового давления для составляющих  $p_1$  и  $p_2$  в среде с приведен-

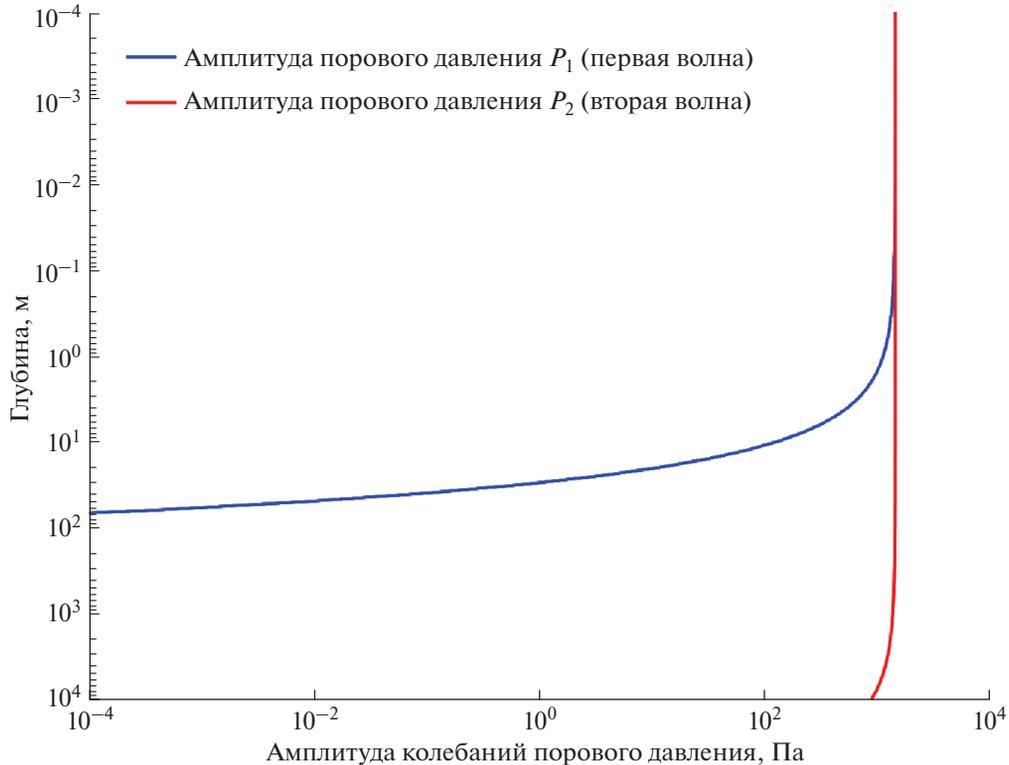


Рис. 2. Графики амплитуды первой и второй составляющих порового давления внутри среды, рассчитанные в соответствии с выражениями (32)–(33).

ными выше параметрами в зависимости от глубины.

### ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Напряженность электрического поля в электрокинетическом эффекте определяется формулой

$$\mathbf{E} = C \nabla p, \quad (34)$$

здесь  $C$  – локальный коэффициент потокового потенциала. Для различных песчаников и пористых пород согласно [Сурков, 2000]  $C \approx (4 - 5) \times 10^{-6}$  В/Па. Электрическое поле имеет две компоненты – горизонтальную  $E_x$  и вертикальную  $E_z$ :

$$E_x = C \frac{q\vartheta_0}{d} k [\exp(z/\delta) \sin(kx - z/\delta - \omega t) - \exp(\chi_\ell z) \sin(kx - \omega t)], \quad (35)$$

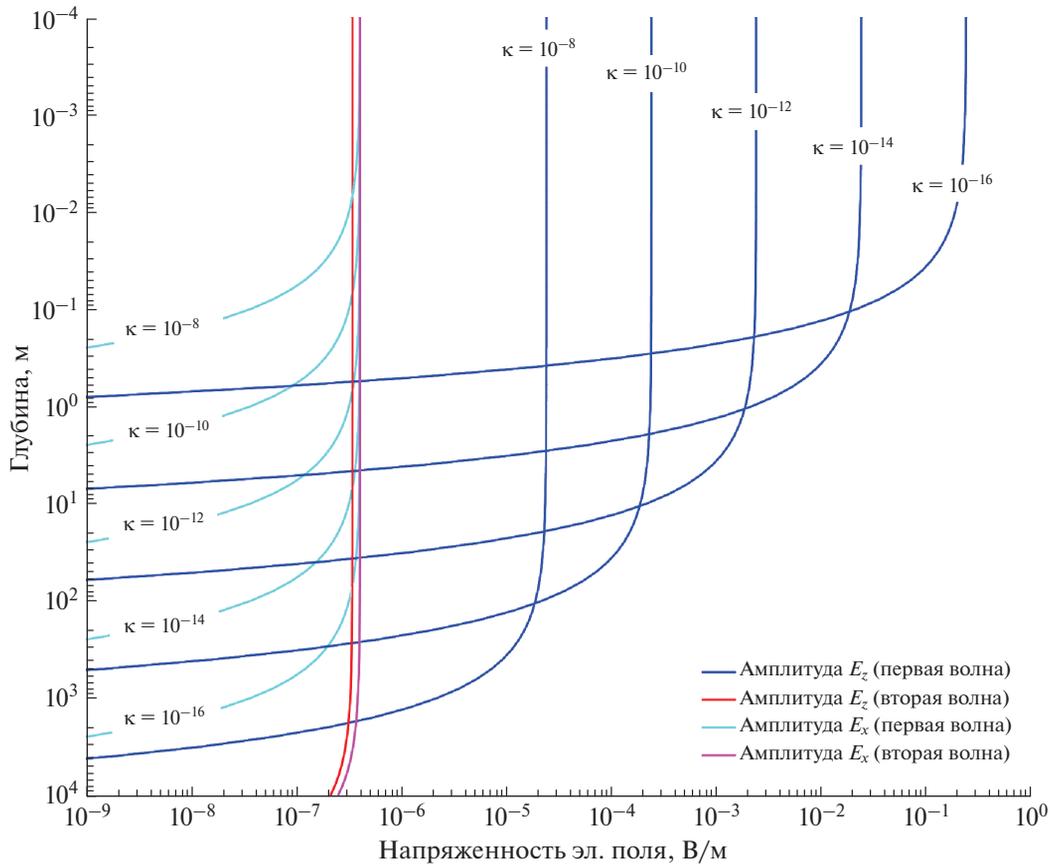
$$E_z = -C \frac{q\vartheta_0}{d\delta} [\sqrt{2} \exp(z/\delta) \sin(kx - z/\delta - \omega t) + \delta\chi_\ell \exp(\chi_\ell z) \cos(kx - \omega t)]. \quad (36)$$

Горизонтальная компонента на поверхности равна нулю. На глубине при  $z \rightarrow -\infty$  она также обращается в нуль. В то же время, вертикальная компонента характеризуется иным поведением,

принимая ненулевое значение на поверхности среды.

В случае выбранных выше параметров среды  $\delta \cong 0.132$  м,  $\delta\chi_\ell \cong 6.33 \times 10^{-6} \ll 1$ . Отсюда следует, что основной вклад в вертикальную компоненту напряженности электрического поля вносит приповерхностная волна  $p_1$ , максимальная амплитуда компоненты  $E_z$  достигается на границе  $z = 0$ . Используя сделанные ранее оценки параметров  $q, \vartheta_0, d$  и считая потоковый потенциал равным  $C = 4.5 \times 10^{-6}$  В/Па, можно заключить, что при рассматриваемых характерных значениях деформации, вызванной приходом телесеismicической поверхностной волны, ожидаемые амплитуды вертикальной составляющей сейсмоэлектрического сигнала лежат в диапазоне от десятков мкВ/м для хорошо проницаемых гравийно-песчаных водонасыщенных грунтов (проницаемость  $10^{-8}$  м<sup>2</sup>) до десятых долей В/м и даже первых В/м в плохопроницаемых формациях с проницаемостью  $10^{-16}$ – $10^{-17}$  м<sup>2</sup> (рис. 3).

С учетом современных возможностей регистрации и обработки записей электрического поля, указанные величины допускают их уверенное детектирование.



**Рис. 3.** Графики амплитуды вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности электрического поля для первой и второй волн внутри среды, рассчитанные в соответствии с выражениями (35)–(36) при различных значениях проницаемости среды (последние указаны на графиках в м<sup>2</sup>).

С понижением проницаемости отмечается рост амплитуды  $E_z$  в первой волне вблизи земной поверхности с одновременным уменьшением глубины, на которой происходит быстрое затухание данной компоненты поля. Такое поведение определяет возможность оценки проницаемости по наблюдаемому значению амплитуды  $E_z$  при условии задания других параметров среды.

Графики амплитуды вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности электрического поля для первой и второй волн внутри среды показаны на рис. 3.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В представленном исследовании на примере записей телесеismicического сигнала, зарегистрированного на Аляске после сильнейшего Суматранского землетрясения ( $M = 9.0$ , 2004 г.) проведена оценка параметров деформации среды, сопровождающей распространение поверхностной волны Рэлея и получено аналитическое решение уравнения Френкеля, описывающего возмущения порового давления, происходящие в одно-

родной влагонасыщенной пороупругой среде в процессе распространения такой волны.

На основании записей колебаний, зарегистрированных сетью сейсмологических станций на Аляске, и с использованием полученных ранее другими авторами оценок по периоду колебаний (~30 с) и скорости распространения (~3.7 км/с) волны Рэлея [West et al., 2005], были вычислены характерные значения длин затухания ее продольной и поперечной составляющих (20 и 45 км соответственно), отношение их амплитуд (~0.68), а также сами амплитуды смещений (~0.7 см для вертикальной компоненты). Кроме того, были получены выражения и оценки для параметров, необходимых для вычисления величины объемной деформации, используемой в последующем анализе при решении уравнения флюидодинамики (уравнения Френкеля) для возмущений порового давления. Полученное по указанным данным значение амплитуды объемной деформации составило около  $2 \times 10^{-7}$ .

На последующем этапе анализа в рамках уравнения Френкеля было получено аналитическое решение для поля порового давления и связанно-

го с ним электрического поля электрокинетической природы, сопровождающих распространение волны Рэлея. Задача решена в частотной области с учетом граничного условия  $p = 0$  на земной поверхности; показано, что решение может быть записано в виде суммы двух волн, первая из которых преобладает в самом приповерхностном слое и быстро затухает с глубиной, а вторая охватывает существенно больший интервал глубин и связана с распространением продольной составляющей волны Рэлея.

Скорость экспоненциального затухания первой волны по глубине определяется толщиной скин-слоя, зависящей от коэффициента проницаемости пороупругой среды и ряда других параметров. Эта особенность приводит к сильной чувствительности вертикальной компоненты электрического поля, ассоциированного с первой волной, к изменению проницаемости поверхностного слоя, и открывает возможность ее определения по наблюдаемым величинам сейсмоэлектрического сигнала, аналогично тому, как это было показано в случае полей приливного происхождения [Гохберг и др., 2007; 2009; Алексеев, Гохберг, 2018; 2019]. Первая волна создает доминирующую часть электрокинетического эффекта на поверхности среды. В соответствии с уравнением Гельмгольца—Смолуховского были получены выражения для вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности электрического поля, а также оценки этих величин, отвечающие определенным на первом этапе параметрам волны Рэлея.

Полученная оценка амплитуды вертикальной составляющей электрического поля для рассмотренного телесеismicического сигнала лежит в диапазоне от десятков мкВ/м в случае хорошо проницаемых гравийно-песчаных водонасыщенных грунтов (проницаемость  $10^{-8} \text{ м}^2$ ) до десятых долей В/м и даже первых В/м в случае плохопроницаемых ( $10^{-16}$ – $10^{-17} \text{ м}^2$ ) формаций. В то же время, вторая составляющая порового давления не сопровождается столь быстрым затуханием, и ее градиент оказывается существенно ниже, что соответствует характерным амплитудам электрического сигнала на уровне первых мкВ/м и менее.

Важнейшим результатом является выявленная зависимость не только толщины скин-слоя, но и амплитуды вертикальной составляющей электрического поля от проницаемости среды.

Еще одним следствием полученных результатов является то, что наблюдаемое в аналитическом решении поведение, связанное с быстрым затуханием давления ниже земной поверхности, по-видимому, должно наблюдаться и в случае произвольных сейсмических волн, распространяющихся внутри слоистой среды. Это обстоятельство требует исключительно тщательной

подготовки сеток в рамках численного моделирования, с логарифмическим изменением размера элементов по глубине внутри каждого слоя модели. В противном случае, численное решение механоэлектромагнитной задачи не будет способно отразить быстрые пространственные изменения поля порового давления, и информация о его зависимости от фильтрационных параметров среды будет утрачена.

Подводя итог, следует отметить, что полученные аналитические соотношения дают принципиальную возможность для определения ряда фильтрационных и геомеханических параметров приповерхностного слоя среды по измерениям электрического поля вблизи поверхности (в неглубоких скважинах).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00691).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Д.А., Гохберг М.Б.* О возможности оценки свойств земной коры по наблюдениям электрического поля электрокинетической природы, генерируемого приливными деформациями в зоне разрывного нарушения // *Физика Земли*. 2018. № 3. С. 106–122.
- Алексеев Д.А., Гохберг М.Б.* Электрическое поле приливного происхождения в многослойной среде и возможности его использования для оценки упругих свойств и проницаемости формаций // *Физика Земли*. 2019. № 2. С. 168–180.
- Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Колосницын Н.И.* Мониторинг деформационных процессов посредством наблюдения вертикальной компоненты электрического поля. Очерки геофизических исследований. М.: ОИФЗ РАН. 2003. С. 250–256.
- Гохберг М.Б., Колосницын Н.И., Николаев А.И.* Приливные деформации и электрокинетический эффект в двухслойной поронасыщенной среде // *Физика Земли*. 2007. № 8. С. 85–89.
- Гохберг М.Б., Колосницын Н.И., Лапшин В.М.* Электрокинетический эффект в приповерхностных слоях Земли // *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 13–19.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Теория упругости. М.: Наука. 1965. 204с.
- Лейбензон Л.С.* Курс теории упругости. ОГИЗ. 1947. 465 с.
- Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф. и др.* Основы сейсмоэлектроразведки. М.: Недра. 1995. 267 с.
- Светов Б.С.* Основы геоэлектрики М.: ЛКИ. 2008. 656 с.
- Сурков В.В.* Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ. 2000. 448 с.
- Физические величины. Справочник / Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.).* М.: Энергоатомиздат. 1991. 1232 с.
- Френкель Я.И.* К теории сейсмических и сейсмо-электрических явлений во влажной почве // *Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз.* 1944. Т. С. 134–157.

- Biot M.* General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material // *J. Appl. Mech. Trans. ASME*. 1956. V. 78. P. 91–96.
- Garagash I.A., Gokhberg M.B., Kolosnitsyn N.I.* Monitoring of deformation process by means of electric field observation. *Mud Volcanoes. Geodynamics and Seismicity / G. Martinelli, B. Panahi (eds.)*. Springer. 2005. P. 171–179.
- Gershenson N., Bambakidis G.* Modeling of seismo-electromagnetic phenomena // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2001. V. 3. № 4. P. 247–275.
- Ivanov A.* Effect of electrization of earth layers by elastic waves passing through them // *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1939. № 24. P. 42–45. (in Russian).
- Ivanov A.G.* Seismoelectric effect of the second kind // *Bull. Acad. Sci. USSR Ser. Geogr. Geophys.* 1940. № 5. P. 600–727. (in Russian)
- Jouniaux L., Zyserman F.* A review on electrokinetically induced seismo-electrics, electro-seismics, and seismo-magnetics for Earth sciences // *Solid Earth*. 2016. V. 7. P. 249–284.
- Naumovich A.* Efficient numerical methods for the Biot poroelasticity system in multilayered domains. PhD Thesis. Keiserslautern university. 2007.
- Pride S.R.* Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // *Phys. Rev.* 1994. V. B50. P. 15678–15696.
- Revil A., Jardani A.* Seismoelectric response of heavy oil reservoirs: theory and numerical modelling // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 180. P. 781–797.
- Revil A., Jardani A., Sava P., Haas A.* The Seismoelectric Method: Theory and applications. Wiley. 2015. 244 p.
- Schon J.H.* Physical Properties of Rocks. A Workbook. Elsevier. 2011. 494 p.
- Svetov B.S.* Self-Consistent Problems of Geoelectrics. Electromagnetic sounding of the Earth's interior: Theory, Modeling, Practice. Second edition / *Spichak V.V.* (ed.). Elsevier. 2015. P. 79–106.
- Thompson R.R.* The seismic-electric effect // *Geophysics*. 1936. V. 1. № 3. P. 48–51.
- West M., Sanchez J.J., McNutt S.R.* Periodically triggered seismicity at Mount Wrangell, Alaska, after the Sumatra earthquake // *Science*. 2005. V. 308. P. 1144–1146.

## Seismoelectric Effect Associated With Rayleigh Wave Propagation

M. B. Gokhberg<sup>a</sup>, N. I. Kolosnitsyn<sup>a, †</sup>, A. O. Pliss<sup>b</sup>, and D. A. Alekseev<sup>a, b, c, d, \*</sup>

<sup>a</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia*

<sup>b</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

<sup>c</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>d</sup> *AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia*

\*E-mail: alexeevgeo@gmail.com

Within the framework of the Frenkel equation, an analytical solution is obtained for the pore pressure and electrokinetically-induced electric field, caused by the Rayleigh surface wave propagation in a poroelastic fluid-saturated medium. The problem is solved in the frequency domain, taking into account the boundary condition on the earth's surface. It is shown that the solution can be written as a sum of two waves, the first of which prevails in the near-surface layer and rapidly decays with depth, while the second involves a much larger depth interval and is associated with the longitudinal component of the Rayleigh wave. The rate of exponential decay of the first wave in depth is determined by the skin depth, which in turn depends on the permeability coefficient and a number of other parameters. This feature leads to a strong sensitivity of the vertical component of the electric field associated with the first wave to a change in the permeability of the superficial layer, and opens up the possibility of its determination from the observed values of the seismoelectric signal. The first wave creates the dominant part of the electrokinetic effect on the surface. In accordance with the Helmholtz-Smoluchowski equation, we derived the expressions for the vertical and horizontal components of the electric field strength. Based on the estimated parameters of the Rayleigh wave recorded in the area of Mount Wrangell in Alaska after the Sumatran M9.0 2004 earthquake, we found that the magnitude of the vertical component of the coseismic electric field falls between dozens of microvolts per meter to few volts per meter, depending on permeability coefficient.

**Keywords:** Biot theory, Frenkel equation, porous fluid-saturated medium, earthquakes, Rayleigh wave, electric field, electrokinetic effect